

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

УДК 621.3.082.62

DOI:10.30837/rt.2024.1.216.10

*О.В. МЯГКИЙ, канд. техн. наук, Р.П. ОРЕЛ, канд. техн. наук,
С.Н. МЕШКОВ, канд. техн. наук, В.О. СТОРОЖЕНКО, д-р техн. наук*

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕРС НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕФЕКТІВ

Вступ

Протягом наступних десятиліть очікується значне збільшення енергоспоживання, пов'язане з розвитком економіки та приростом населення. Це призведе до зростання тиску на систему енергопостачання та вимагатиме підвищеної уваги до ефективності використання енергії. Це проблеми сучасної енергетики, які треба вирішувати зараз. Доступність енергоресурсів є ключовим фактором для розвитку економіки та сприяє покращенню якості життя. Як правило, в основі прогнозів енергоспоживання лежать такі фактори, як зростання світових економік та збільшення чисельності населення, що виступають як основна рушійна сила безперервного зростання енергоспоживання.

Проблему зі зростаючим енергоспоживанням та скороченням енергетичних ресурсів передбачалося вирішувати за рахунок альтернативних джерел енергії та енергозбереження, адже виснаження родовищ нафти, вугілля та газу може призвести до глобальної енергетичної катастрофи. Адже традиційні джерела енергії обмежені. А вітер, Сонце, річки, океани і моря мають невичерпні запаси енергії. Найбільше стабільним і прогнозованим з цих джерел є Сонце, тому в енергетиці зростає зацікавленість до нових систем перетворення цього виду енергії. У якості подібних систем найбільш часто використовуються сонячні панелі. Це зумовлює дослідницьку увагу до їх вдосконалення.

Суттєвим недоліком сонячних панелей є відносно невелика ЕРС. Перспективним напрямком підвищення ЕРС таких пристроїв є напilenня або конденсація на них напівпровідникових структур GeS [1, 2].

Генеруючі ЕРС-структури на основі GeSi

Принцип дії варізонного генеруючого елемента ґрунтується на явищі виникнення термоЕРС у неоднорідному напівпровіднику за умови розігріву структури.

Для нашої системи повинні виконуватися такі основні співвідношення для напруженості електричного поля \vec{E} та електрорушійної сили (ЕРС) ε :

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi,$$

$$\varepsilon = IR,$$

де φ – потенціал електричного поля; I – сила струму; $R = \int \frac{dx}{\sigma}$ повний електричний опір;

σ – електропровідність.

Для спрощення завдання вважаємо, що \vec{E} і ε є одномірними функціями. Тоді густина результуючого струму, що викликаний нерівноважними носіями зарядів для k -го елемента можна записати [3, 4]:

$$j_k = -\sigma_k \left(\frac{d\tilde{\varphi}_k}{dx} + \alpha_k \frac{dT_k}{dx} \right), \quad (1)$$

де σ_k – електропровідність речовини k -го елемента; $\tilde{\varphi}_k$ – електрохімічний потенціал речовини k -го елемента; α_k – коефіцієнт термоЕРС; T_k – температура k -го елемента.

Електрохімічний потенціал речовини визначається за формулою

$$\tilde{\varphi}_k = \frac{F_k}{e_k} = \varphi + \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

де F_k – квазірівень Ферми речовини k -го елемента; e_k – заряд носіїв k -го елемента; μ_1 і μ_2 – хімічні потенціали речовин першого та другого типу.

Тоді вираз (1) можна привести до вигляду:

$$\varepsilon = \int \frac{\sigma_1}{\sigma} \frac{dy}{dx} (\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1) dx = \int \frac{\sigma_2}{\sigma} \frac{dy}{dx} (\tilde{\varphi}_1 - \tilde{\varphi}_2) dx. \quad (2)$$

З урахуванням (1), (2) система, що розглядається, повинна задовольняти рівнянню

$$\varepsilon = - \int \sum_{k=1}^N \frac{\sigma_k}{\sigma} \left(\frac{d}{dx} \tilde{\varphi}_k + \alpha_k \frac{d}{dx} T_k \right) dx, \quad (3)$$

де $\sigma = \sum_{k=1}^N \sigma_k$ – загальна електропровідність контуру; N – кількість шарів SiGe, $N = 2$.

Видно, що температура T_k входить у рівняння (3) у двох доданках: безпосередньо у α_k (градієнт T) і опосередковано в $\tilde{\varphi}_k(T)$. У випадку $T_k = \text{const}$ складова $\alpha_k = 0$.

Розглянемо рівняння (1) з урахуванням виразу (3), яке описує термоЕРС. При $T_k = \text{const}$ та виконанні умови

$$\psi = \left(\frac{\mu_2}{e_2} - \frac{\mu_1}{e_1} \right) \neq \text{const}$$

отримується співвідношення для електропровідності:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \neq \text{const}.$$

Після заміни змінних щодо $\tilde{\varphi}_k(T)$ отримаємо

$$\varepsilon = \int \frac{\sigma_1}{\sigma} \frac{d}{dx} \left(\frac{\mu_2}{e_2} - \frac{\mu_1}{e_1} \right) dx = \int \frac{\sigma_2}{\sigma} \frac{d}{dx} \left(\frac{\mu_1}{e_1} - \frac{\mu_2}{e_2} \right) dx. \quad (4)$$

Очевидно, що вираз (4), що описує нерівноважність і неоднорідність напівпровідникового матеріалу, а також його біполярність ($N = 2$), є відомою умовою виникнення ЕРС у напівпровіднику і визначає збільшення перепаду концентрацій носіїв зарядів [5]. Таким чином, у розімкнутому ланцюгу виникає ЕРС, а при замиканні ланцюга тече електричний струм у повній відповідності до рівняння (1).

Описану модельну ситуацію можна побачити у варізонному напівпровіднику SiGe [6, 7].

Для отримання максимального значення термоЕРС запропоновано наступну двошарову структуру: два варізонні шари SiGe (рис. 1, а) при об'єднанні яких у площині контакту утворюється гетероперехід (рис. 1, б).

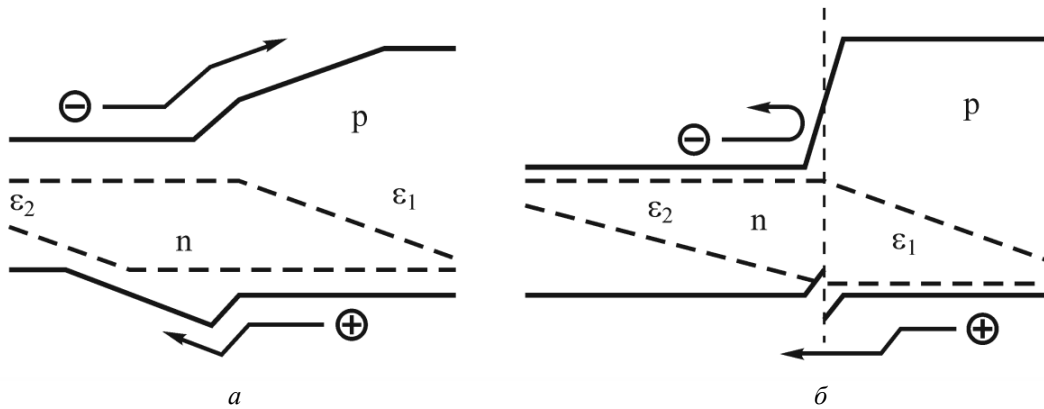


Рис. 1. Інжекція носіїв зарядів у гетеропереході при прямому зміщенні з урахуванням рівнів Фермі в структурі: *a* – у плавному гетеропереході за наявності внутрішніх «полів, що тягнуть», *б* – одностороння інжекція дірок у різкому гетеропереході

Отриманий гетероперехід має більшу генеруючу здатність. При цьому шари SiGe виконують функцію підвищення генеруючої здатності, чим формує цілісну структуру [8].

Моделювання та розрахунок температурного поля структури

Згідно з рівнянням (3), температура T двічі входять в рівняння (2), і досліджуваний об'єкт має складну двошарову структуру з параметрами, що плавно змінюються. Таким чином, для розрахунку поширення в ній тепла та зміни температури було запропоновано наступну теплофізичну модель [9, 10], що зображена на рис. 2.

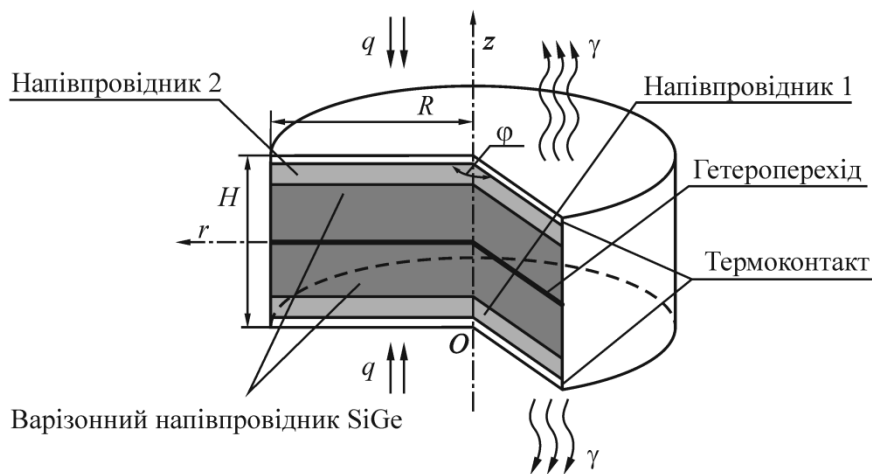


Рис. 2. Теплофізична модель варіозного напівпровідника у циліндричних координатах

Розрахунок за наведеною теплофізичною моделлю заснований на розв'язку диференціального рівняння нестационарної теплопровідності граничними умовами. Зважаючи на центральну симетрію моделі зручно використовувати циліндричну систему координат. Тоді рівняння нестационарної теплопровідності для неї матиме вигляд [11]:

$$\operatorname{div}(\lambda(\vec{r}, T) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (5)$$

де $\lambda(\vec{r}, T)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу елемента; \vec{r} – радіус-вектор елемента; $T(\vec{r}, t)$ – температура елемента; $q(\vec{r}, t)$ – функція внутрішніх джерел тепла; c – питома теплоємність матеріалу елемента; ρ – густина елемента.

На зовнішніх поверхнях досліджуваної структури для рівняння (5) виконуються граничні умови 2-го та 3-го роду [12]:

– для $z = H$ (зовнішня межа, яка контактує з джерелом нагріву)

$$\left(\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \Big|_S = \gamma \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{cp} \right) - q(\vec{r}, t),$$

де γ – коефіцієнт тепловіддачі поверхні; q – густина потоку тепла від джерела; T_{cp} – температура навколишнього середовища;

– для $z = 0$ (зовнішня межа, яка не контактує з джерелом нагріву)

$$-\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \Big|_S = -\gamma \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{cp} \right),$$

– для $z = h$ (межа розділу між шарами)

$$-\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \Big|_S = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \Big|_S.$$

Для розв'язку рівняння (1) застосовано чисельний (сіточний) метод кінцевих різниць та метод кінцевих елементів.

В результаті розрахунків за рівняннями (4) і (5) отримуємо, що сумарна ЕРС досліджуваної структури описується виразом

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3,$$

де ε_1 – термоЕРС першого варізонного напівпровідника; ε_2 – термоЕРС гетеропереходу; ε_3 – термоЕРС другого варізонного напівпровідника.

В результаті проведеного моделювання встановлено що в рамках заданої моделі рекомендованою температурою для роботи елементів на основі з'єднань SiGe є $T_{рек} = 353 - 358$ К, а додаткова ЕРС склала 1,12 В, при цьому неоднорідність матеріалів, що враховується, у виготовлених варізонних шарах напівпровідників не перевищувала 5 %.

Висновки

1. Представлено двошарову варізонну структуру, що має три генеруючі шари.
2. Побудовано теплофізичну модель зазначеної структури, що дозволяє зробити розрахунок зовнішнього та внутрішнього температурних полів.
3. Визначено температурні межі найефективнішої роботи системи, що становлять 353 – 358 К.
4. Відповідно до розрахунків рівень додаткової ЕРС становить не менше 18 %.

Список літератури:

1. Saidov A., Leyderman A.Yu., Karshiev A.B. Photothermovoltaic Effect in a SixGe1-x Variband Solid Solution // Applied Solar Energy, 2019. №1(55). P. 12–17.
2. Хворостяний А.Д., Гензель В. Термоелектричний генератор. Пат. 119222 Україна МПК H01L35/00, заявл. 03.07.17; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17, 8 с.
3. Гуревич Ю.Г., Юрченко В.Б. Проблемы формирования ЭДС в полупроводниках и вывода ее во внешнюю цепь // Физика и техника полупроводников. 1991. Вып. 12, т. 25. С. 2109–2114.
4. Fakhri M.A., Alwahib A.A., Salim E.T. Preparation and Characterization of UV-Enhanced GaN/Porous Si Photodetector using PLA in Liquid // Silicon. 2023. Vol. 15. P. 7523–7540.

5. Усмонов Ш., Мягкий А., Саидов А., Усмонова С. Термовольтаический эффект в варизонных полупроводниках // International Conference “Fundamental and Applied Problems of Physics”, September 22-23, 2020. P. 188–190.
6. M.A. Loganathan Ravi, K-L Rather, C-T Lin, T-Y Wu, K-Y Yu, Lai, J-I Chyi. Epitaxial Growth of GaN/AlN on h-BN/Si (111) by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition: An Interface Analysis // ACS Applied Electronic Materials. 2023. Vol. 5(1). P. 146–154.
7. J-H Lee, K-S Im. Growth of High Quality GaN on Si (111) Substrate by Using Two-Step Growth Method for Vertical Power Devices Application. Crystals. 2021. Vol. 11(3), 234.
8. Saidov A.S., Usmonov S.N., Saparov D.V. Structural Studies of the Epitaxial Layer of a Substitutional Solid Solution (GaAs)_{1-x}(ZnSe)_x with Nanocrystals // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019, Article ID 3932195, 9 p.
9. Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В. Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования // Вісник НТУ “ХПІ”. 2008. №48. С. 50–54.
10. Малик С.Б., Мягкий А.В., Стороженко А.В. Повышение чувствительности тепловой дефектоскопии в условиях наличия излучательной помехи // Вісник НТУ “ХПІ”. 2009. №14. С. 49–52.
11. Лазоренко О.В., Стороженко В.А., Мягкий А.В. Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня // Вісник НТУ “ХПІ”. 2013. № 34. С. 108–112.
12. Storozhenko V., Myagkiy A., Orel R. Optimization of the Procedure of Thermal Flaw Detection of the Honeycomb Construction by Improving of Accuracy of Interference Function // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. №5/5 (83). P. 12–18

Надійшла до редколегії 23.02.2024

Відомості про авторів:

Мягкий Олександр Валерійович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізики; Україна; e-mail: aleksandr.mjagky@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>

Орел Роман Петрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізики; Україна; e-mail: roman.orel@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>

Мешков Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізики; Україна; e-mail: sergiy.meshkov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>

Стороженко Володимир Олександрович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри фізики; Україна; e-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>